



## **Recuperación de Energía de Aguas Residuales Mediante Microorganismos I**

## **Wastewater Energy Recovery Through Microorganisms I**

### **MÁSTER UNIVERSITARIO EN HIDROLOGÍA Y GESTIÓN DE RECURSOS HÍDRICOS**

**Presentado por: SongYan Shi**

**Dirigido por: Eloy García Calvo**

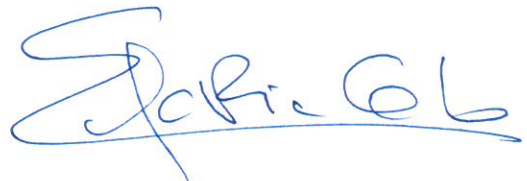
**Alcalá de Henares, a 31 de mayo de 2019**

Eloy García Calvo

CERTIFICA:

Que el trabajo titulado **Recuperación de energía de aguas residuales mediante microorganismos I** ha sido realizado bajo mi dirección por el alumno SongYang Shi

Alcalá de Henares, 31 de mayo de 2019

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'Eloy García Calvo', with a stylized, cursive script.

# Recuperación de energía de aguas residuales mediante microorganismos

## I

### Índice

1. Resumen.....	3
2. Introducción.....	3
3. La producción de hidrógeno por fermentación anaeróbica.....	3
3.1 Mecanismo de producción de hidrógeno biológico de la fermentación de aguas residuales.....	5
3.2. Dos tecnologías para la fermentación del hidrógeno.....	5
3.2.1 Factores que afectan la producción de hidrógeno fermentativo.....	7
-La temperatura.....	7
-pH.....	8
-Tipo de sustrato y concentración.....	8
-Tiempo de retención hidráulico.....	9
-Otros factores influyentes.....	9
3.3 Perspectivas de producción de hidrógeno por fermentación anaeróbica.....	9
4. La producción de biogás por fermentación anaeróbica.....	10
4.1 Recuperación directa de biogás en la etapa de tratamiento anaeróbico de aguas residuales.....	10
4.1.1 Factores que afectan la producción de biogás fermentado.....	11
-Bacterias del biogás.....	12
-Materia prima de fermentación.....	12
-La temperatura.....	13
-Otros factores.....	13
4.2 Estimación de la producción del biogás en aguas residuales urbanas (1 millón de habitantes).....	13

-Uso de residuos del biogás.....	14
4.3 Recuperación indirecta del biogás a partir de la digestión anaerobia de lodos.....	15
-Uso efectivo del biogás energético.....	16
5. Tecnología de celda de combustible microbiana.....	17
5.1 Principio de la celda de combustible microbiana.....	19
5.2 Estado y perspectivas de la tecnología.....	23
5.3 Perspectiva.....	27
6. Comparación de tres bioenergías.....	27
7. Conclusión.....	29
8. BIBLIOGRAFÍA.....	30

## **1. Resumen**

El incremento de la contaminación ambiental y la profundización de la crisis energética ha incrementado la cantidad de las personas que buscan energía renovable "verde". Más científicos están dirigiendo gradualmente su atención a las aguas residuales que contienen una energía enorme. El biogás de fermentación anaeróbica, la producción de hidrógeno por fermentación anaeróbica y las celdas de combustible microbiano son las tres formas principales de recuperar la energía de la biomasa de las aguas residuales mediante la biotecnología. Sus enormes beneficios ambientales y energéticos y sus amplias perspectivas atraen innumerables atenciones. Se ha convertido en el foco de investigación en los últimos años. Este documento presenta el mecanismo de operación y el estado de desarrollo de estas tres tecnologías, compara y pronostica las tres.

## **2. Introducción**

El biogás de fermentación anaeróbica, la fermentación anaeróbica para producir hidrógeno y la tecnología de celdas de combustible microbianas son las tres formas principales de recuperar energía usando microorganismos durante el tratamiento de aguas residuales. De acuerdo con la situación actual de la investigación, el documento describe los principios operativos, las condiciones de impacto, los beneficios de productividad y los beneficios económicos de las tres tecnologías. Y compara exhaustivamente las perspectivas de desarrollo y la rentabilidad de estos tres métodos.

## **3. La producción de hidrógeno por fermentación anaeróbica**

Los problemas de energía y contaminación ambiental se han convertido gradualmente en el principal factor limitante para el desarrollo sostenible en todo el mundo, por lo que el desarrollo de fuentes de energía alternativas es cada vez más importante. Entre las muchas nuevas fuentes de energía, el hidrógeno ha recibido una atención más amplia. En comparación con otras fuentes de energía nuevas, el hidrógeno tiene algunas características notables:

- (1) El hidrógeno es el elemento más abundante en el universo. El 75% de la masa en el universo consiste en hidrógeno, que es inagotable.
- (2) un alto valor de combustible: En el hidrógeno, la más alta relación de energía alcanza 34,15 kcal / g; gasolina solamente 13 kcal / g, combustible de aviación era 12,15 kcal / g, el carbón es solamente 4,837 kcal / g;

- (3) Limpio y libre de contaminación: cuando el hidrógeno se quema, no producirá gases de efecto invernadero ni otras sustancias nocivas. El producto de combustión del hidrógeno y el oxígeno es la sustancia más pura, no causará ninguna contaminación al ambiente, mucho más limpia que los combustibles fósiles.
- (4) Simplicidad química: cuando libera energía rápidamente, destruye y forma relativamente pocos enlaces, tiene una constante de alta velocidad de reacción y una cinética de proceso de electrodo rápida, y puede liberar electroquímicamente su energía.
- (5) Amplia gama de aplicaciones: se puede utilizar como combustible de alta energía, ampliamente utilizado en los transbordadores espaciales, cohetes y vehículos urbanos modernos; el hidrógeno también se usa como gas protector en la industria electrónica y en el procesamiento a alta temperatura del proceso de alta temperatura restante. Además, el hidrógeno es ampliamente utilizado en la industria del refinado, la industria de síntesis orgánica, la industria del amoníaco sintético y la tecnología de procesamiento de alimentos, y la energía del hidrógeno es imparable en todas las áreas de la vida social.

Por eso, el hidrógeno ha recibido mucha atención como fuente de energía secundaria limpia, eficiente y renovable. Se predice que el hidrógeno se convertirá en la fuente de energía verde limpia más ideal en este siglo, y es un sustituto prometedor para los combustibles fósiles.

Actualmente, el 96% de la producción mundial de hidrógeno se extrae de gas natural, carbón y productos derivados del petróleo, y el 4% se obtiene por electrólisis del agua. Los métodos químicos requieren una gran cantidad de recursos minerales, y los contaminantes producidos al mismo tiempo causarán daños al ambiente, el uso de métodos biológicos para la producción de hidrógeno ha atraído cada vez más atención. El método de producción de hidrógeno biológico incluye principalmente dos tipos de producción de hidrógeno por gasificación por biomasa y producción de hidrógeno por fermentación microbiana, y la producción de hidrógeno por fermentación microbiana es un método de preparación de hidrógeno más prometedor, incluye fotosíntesis anaerobia y fermentación anaeróbica. Principalmente introducimos la producción de hidrógeno por fermentación anaeróbica.

### 3.1 Mecanismo de producción de hidrógeno biológico de la fermentación de aguas residuales.

Según la composición del producto final, el mecanismo de la fermentación de la producción de hidrógeno se divide en tres categorías: tipo de ácido butírico, tipo de ácido propiónico y fermentación del tipo de etanol, como se muestra en la Tabla 1. En cada método de producción de hidrógeno, hay dos formas principales: una es el sistema de deshidrogenación de piruvato y la otra es el equilibrio NADH / NAD para regular la producción de hidrógeno.

**Tabla 1** Mecanismo de producción biológica de hidrógeno a partir de la fermentación de aguas residuales.

Tipo de fermentación	Tipo de sustrato.	Producción de gas	Producto final principal
Ácido butírico	Carbohidratos solubles (como glucosa, sacarosa, lactosa, almidón, etc.)	Alta	Ácido butírico, ácido acético, H <sub>2</sub> , CO <sub>2</sub> y una pequeña cantidad de ácido propiónico
Ácido propiónico	Compuesto orgánico que contiene nitrógeno	Muy bajo, incluso sin gas.	Ácido propiónico y ácido acético.
Etanol	Principalmente hidratos de carbono	Alta producción de gas y estabilidad.	Etanol, ácido acético, H <sub>2</sub> , CO <sub>2</sub> y una pequeña cantidad de ácido butírico

Gong Manli etc... , Wang Yong etc... , Song Jiaxiu etc... Los experimentos han demostrado, según la capacidad de producción de hidrógeno del sistema, el control de las condiciones de operación, la estabilidad operativa y los costos de producción de hidrógeno, etc. La fermentación de etanol es más adecuada para aplicaciones industriales.

### 3.2. Dos tecnologías para la fermentación del hidrógeno.

En la producción de hidrógeno por fermentación anaeróbica de aguas residuales, existen dos tipos de tecnologías que se estudian actualmente en el país y en el extranjero: (1) tecnología de fermentación de cepa pura inmovilizada; (2) Tecnología de fermentación de cepa mixta no inmovilizada (lodo activado). La tabla 2 muestra una comparación de los

**Tabla 2** Comparación de dos tecnologías de producción de hidrógeno de fermentación

tecnología de fermentación de cepa pura inmovilizada	Tipo de sustrato.	Tecnología de fermentación de cepas mixtas no inmovilizadas (lodos activados).
Ventajas	(1) La cepa seleccionada es una cepa productora de hidrógeno altamente eficiente;	(1) El lodo anaeróbico es rico en bacterias y tiene una gran capacidad de adaptación;
	(2) puede prevenir la pérdida de células y mantener una alta concentración de HPB en el reactor;	(2) Al degradar la materia orgánica compleja, se puede ejercer un efecto sinérgico entre las cepas para promover la producción continua y eficiente de hidrógeno de HPB;
	(3) soportar la carga y bajo pH, puede inhibir la tasa de difusión de oxígeno;	(3) bajo costo, operación y administración convenientes, y favorable para la producción industrial;
	(4) La cantidad de lodos generados es pequeña, lo que es propicio para el tratamiento posterior de las aguas residuales.	(4) Se puede utilizar la fase productora de ácido del proceso de tratamiento biológico anaeróbico de dos fases.
Desventajas	(1) La resistencia a la transferencia de masa interna de las partículas inmovilizadas es grande, lo que dificulta la difusión de $H_2$ y $CO_2$ y conduce fácilmente a la acumulación de metabolitos, generando así una inhibición por retroalimentación y reduciendo la capacidad de producción de hidrógeno;	(1) La concentración de HPB en el reactor es relativamente baja, y el lodo se lava fácilmente;
	(2) El agua residual industrial real tiene una composición compleja y es difícil para las bacterias puras lograr resultados satisfactorios;	(2) El sistema es relativamente débil contra el bajo pH y la carga de choque.
	(3) El proceso es complicado y el costo es alto, lo que no es propicio para la aplicación industrial.	

En la Tabla 2 se puede ver que la tecnología de producción de hidrógeno por fermentación del proceso de lodo activado es más adecuada para aplicaciones industriales. Sin embargo, de hecho, para mejorar aún más la capacidad de producción de hidrógeno del sistema y hacer un uso completo de varias sustancias orgánicas en las aguas residuales orgánicas reales, se deben combinar dos tipos de tecnologías.



### 3.2.1 Factores que afectan la producción de hidrógeno fermentativo.

#### -La temperatura

El crecimiento y la reproducción de los microorganismos deben completarse con reacciones bioquímicas, y las reacciones bioquímicas deben realizarse bajo ciertas condiciones de temperatura, lo que significa que la temperatura es un factor importante en el crecimiento de los microorganismos. Además, la temperatura también afecta a la fluidez de la membrana plasmática, la temperatura es alta y la fluidez es grande, lo que favorece el transporte del material, y viceversa, no contribuye al transporte del material. Por lo tanto, los cambios de temperatura son condiciones importantes que afectan a la fermentación anaeróbica.

Los microorganismos se clasifican en cinco tipos diferentes según la temperatura más adecuada basada en el crecimiento microbiano.: psicrófilico, psicrótrópico, mesófilico, termófilico e hipertermófilico. La Tabla 3 enumera las temperaturas de crecimiento mínimas, óptimas y máximas para diferentes tipos de microorganismos.

**Tabla 3** Rango de temperatura de crecimiento microbiano

Tipo microbiano	Tipo de sustrato.	Produccion de gas	Producto final principal
Psicrófilos	< 0	15	20
Psicrótrofos	0	20-30.	35
Mesófilos	15-20	20-45	>45
Termófilos	45	55-65	80
Hipertermófilos	65	80-90	>100

La temperatura de que se produce el hidrógeno mediante la fermentación de las bacterias se encuentra principalmente en el rango mesófilico, y el rango de temperatura óptimo para la producción de hidrógeno suele ser entre 30 y 40°C. La mayoría de los estudios indican la temperatura óptima de producción de hidrógeno de las bacterias fermentadoras. Entre

35-37°C. También hay algunos informes en el rango de temperatura termofílica, como Yu etc.. encontraron que la temperatura óptima para la producción de hidrógeno utilizando bacterias de fermentación mixtas es de 55°C.

### **- pH**

El pH es otro factor importante que afecta el crecimiento y la reproducción de microorganismos. Un pH demasiado alto o demasiado bajo afecta la reacción enzimática al cambiar la estabilidad de las enzimas en los microorganismos, lo que resulta en una inactivación bacteriana. Además, el pH también puede cambiar la permeabilidad de la membrana plasmática y afectar la tasa de crecimiento de los microorganismos. Por lo tanto, el crecimiento y la reproducción microbianos diferentes tienen un rango de pH adecuado, más allá del cual se inhibirá el crecimiento.

Según la literatura, el rango de pH óptimo para la producción de hidrógeno por *Clostridium butyricum* es aproximadamente 6.0-6.5, mientras que el rango de pH de *Enterobacter aerogenes* es 4.5-6.5. El rango óptimo de pH para la producción de hidrógeno es 5.5-6.0. La mayoría de los estudios han demostrado que el pH óptimo de crecimiento de las bacterias de fermentación anaeróbica es 5.0 a 6.0, y el pH óptimo de producción de hidrógeno es aproximadamente 5.5. También hay algunos estudios diferentes que informan que el rango óptimo de pH de producción de hidrógeno para las fermentaciones de tipo etanol está entre 4.2 y 4.5. El pH óptimo de la producción de hidrógeno de la fermentación del ácido butírico es aproximadamente 6.7.

### **- Tipo de sustrato y concentración.**

En el proceso de fermentación anaeróbica, los sustratos que pueden utilizar las bacterias fermentadoras son principalmente carbohidratos, y los carbohidratos más adecuados son la glucosa y la sacarosa, seguidos de melazas, fructosa, lactosa, xilosa, arabinosa, celulosa y almidón. Además, las residuales orgánicas como las aguas residuales de azúcar y las aguas residuales de bodega también se pueden usar como sustratos. porque también contienen grandes cantidades de carbohidratos, y algunos informes utilizan celulosa cristalina como sustrato. Sin embargo, la proteína y la grasa producen poco hidrógeno durante la fermentación anaeróbica, que es difícil de descomponer por las bacterias y no es adecuada para su uso como sustrato. En cuanto a la concentración de sustrato, a partir de los resultados de la investigación actual, la concentración de bacterias en el reactor es difícil

de mantener en un valor alto, por lo que la concentración de sustrato del afluente es generalmente de 5-20 g / L.

#### **-Tiempo de retención hidráulico.**

En la reacción de producción de hidrógeno anaeróbico, diferentes reactores corresponden a diferentes tiempos de residencia, pero generalmente se mantienen de 2-24 h. Con el reactor agitado de flujo continuo (CSTR) y el reactor anaeróbico de flujo ascendente, la HRT de producción óptima de hidrógeno del reactor suele ser de 2 -12 h, y el tiempo de residencia óptimo es de aproximadamente 6 horas; En el reactor por lotes, el tiempo de residencia óptimo de producción de hidrógeno suele ser entre 4-12 h. Para reactores empacados, el tiempo de residencia óptimo de producción de hidrógeno es generalmente de 2-6 h. Por otro lado, en la reacción de producción de hidrógeno anaeróbica, generalmente hay una variedad de bacterias tales como bacterias metanogénicas, bacterias sulfuradas, etc., para mejorar la capacidad de producción de hidrógeno, es necesario inhibir la actividad de los metanógenos, las bacterias fermentadoras también crecen más rápido que los metanógenos, y el rango de adaptación al pH también es amplio. Por lo tanto, la separación dinámica de las bacterias en fermentación y las bacterias metanogénicas se puede lograr cambiando las condiciones del proceso, como el pH y el tiempo de retención hidráulica, mejorando así la capacidad de producción de hidrógeno de todo el reactor.

#### **-Otros factores influyentes.**

Además de los principales factores discutidos anteriormente, los factores que afectan la producción de hidrógeno por la fermentación anaeróbica de las bacterias son el oxígeno, el potencial redox de la solución, los iones de metales pesados como el cobre, las sustancias tóxicas orgánicas y la concentración de nitrógeno en el amoníaco. Estos factores tienen un cierto efecto inhibitorio sobre las bacterias fermentadoras, y el grado de inhibición está estrechamente relacionado con la concentración de la sustancia, y también tiene una cierta relación con el valor de pH de la solución.

### **3.3 Perspectivas de producción de hidrógeno por fermentación anaeróbica.**

La producción de hidrógeno por fermentación anaeróbica es una tecnología de producción de hidrógeno efectiva, económica y sostenible. En la actualidad, el mundo ha avanzado en la domesticación de los lodos de producción anaeróbica de hidrógeno, el potencial de producción de hidrógeno de diferentes sustratos, los factores que influyen en la producción

de hidrógeno por fermentación anaeróbica y el modelo matemático, pero todavía hay muchos problemas de teórico y técnico que necesitan resolver. Debido a las amplias perspectivas de aplicación, puede aportar energía limpia a los seres humanos y obtener recursos de desecho y protección del medio ambiente. Por lo tanto, la investigación debe fortalecerse en esta dirección para lograr aplicaciones industriales.

#### **4. La producción de biogás por fermentación anaeróbica**

Como un subproducto del tratamiento anaeróbico del agua residual y la digestión anaeróbica de lodos, el biogás es una fuente de energía renovable "verde" de gran valor. El componente principal del biogás es el  $\text{CH}_4$ , que es aproximadamente del 60% al 65%.  $\text{CO}$  es aproximadamente de 20% a 25%, y otros gases diversos, como  $\text{H}_2$ ,  $\text{H}_2\text{S}$ ,  $\text{NH}_3$ ,  $\text{CO}$  y  $\text{H}_2\text{O}$  (g) etc., son aproximadamente del 5% al 15%; el valor calorífico de la combustión del biogás es aproximadamente  $21 \sim 23 \text{ MJ} / \text{m}^3$ , equivalente al valor calorífico de  $0.7 \text{ m}^3$  de gas natural, es un combustible excelente.

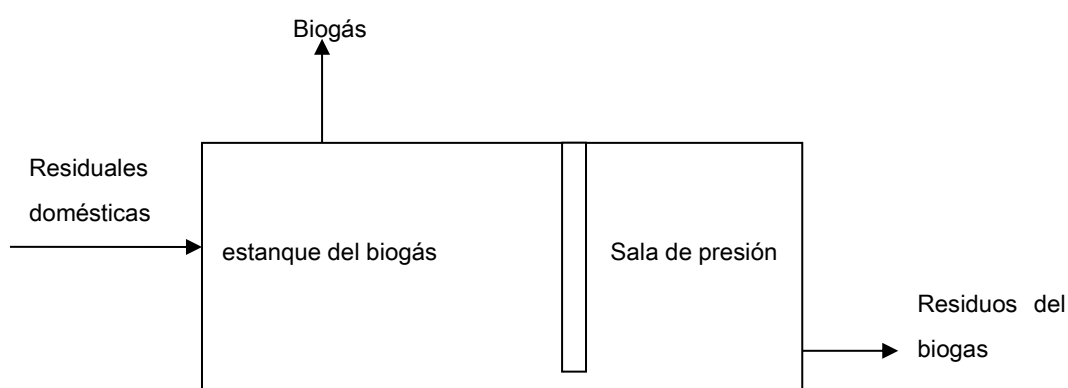
Además, la utilización del biogás está aumentando año tras año en China. En 2005, la utilización del biogás en China fue de 8 mil millones de metros cúbicos. Según el Plan Nacional de Desarrollo a Mediano y Largo Plazo para las Energías Renovables, se estima que para 2010 y 2020, la utilización anual del biogás en China será diferente. Hasta 19 mil millones y 40 mil millones de metros cúbicos, y puede reemplazar 15.2 millones de toneladas / año y 32 millones de toneladas / año de carbón estándar.

En la actualidad, la gente generalmente está de acuerdo con la teoría de la digestión anaeróbica "en tres etapas" propuesta por Bryant en 1979. El proceso de producción de biogás a partir de la fermentación anaeróbica de materia orgánica en aguas residuales se divide en tres etapas: fermentación por hidrólisis, producción de hidrógeno y producción de metano.

##### **4.1 Recuperación directa de biogás en la etapa de tratamiento anaeróbico de aguas residuales.**

Este método no solo puede reducir los costos operativos y de gestión, recuperar energía, también puede acortar el período de recuperación de la inversión del proyecto, el bajo costo de la inversión y tiene importantes beneficios económicos y ambientales. Sin embargo, este método es principalmente aplicable al tratamiento de aguas residuales

industriales de alta concentración, aguas residuales de granjas y aves de corral y aguas residuales domésticas rurales. Para las características de alta concentración y distribución dispersa de aguas residuales rurales., la promoción de los digestores del biogás en los hogares rurales no solo pueden mejorar el saneamiento ambiental rural, el control de la contaminación, sino también brindar energía, fertilizantes y beneficios económicos indirectos a los agricultores. Se estima que después de que se construya y funcione normalmente un digestor del biogás de 8 m<sup>3</sup>, cada hogar recibirá un aumento anual de 800 ~ 1000 yuanes.



**Figura 1** Diagrama de flujo del proceso de fermentación del biogás de residuos.

El flujo del proceso se muestra en la Figura 1. Las aguas residuales entran en el estanque del biogás para la fermentación anaeróbica. Cuando se produce biogás en el estanque del biogás, la presión del estanque del biogás aumenta, lo que obliga a que el nivel de líquido en el estanque caiga y una parte del líquido se comprime en la cámara de presión de agua.

Cuando las personas encienden la estufa, la presión en el estanque del biogás disminuye gradualmente y la presión del agua continúa fluyendo hacia el estanque principal. De esta manera, el gas inmovilizado y el gas se utilizan constantemente para mantener el equilibrio de presión entre la cámara de fermentación y la presión del agua.

#### **4.1.1 Factores que afectan la producción de biogás fermentado.**

La tecnología del biogás, es decir, la tecnología de fermentación anaeróbica, se utiliza principalmente para tratar residuos de origen humanos y animales y aguas industriales orgánicas industriales de alta concentración. El biogás debe tener las siguientes

obligaciones y condiciones correspondientes: cepa del biogás, materia prima de Fermentación, humedad, recipiente cerrado, temperatura y pH.

#### - Bacterias del biogás

Las bacterias del biogás se dividen en dos categorías: una se llama bacteria de descomposición y la otra se llama metanógenos. Su función es primero descomponer la materia orgánica mediante la descomposición de las bacterias y descomponerla en una sustancia orgánica relativamente simple, luego los metanógenos convierten estas sustancias orgánicas relativamente simples en metano y dióxido de carbono. En el proceso de fermentación del biogás, las funciones de estos dos tipos de bacterias no están completamente separadas, sino que se complementan entre sí.

**Tabla 4** Relación entre el tamaño del inóculo y la producción de gas.

Materia prima (materia seca)	Cantidad de inoculación (inóculo a relación total)	Producción del biogás (L)	Contenido de metano (%)	Producción de gas (L / g)
Heces humanas 50 g	10	1.435	48.2	0.029
	20	4.805	56.4	0.096
	50	10.698	66.3	0.214

**Nota: 1. La temperatura de fermentación es de 28 ° C y la producción de gas es de 28 días acumulativa.**

**2. El inóculo es residuo del biogás, y se ha deducido su producción de gas.**

#### - Materia prima de fermentación.

Las bacterias del biogás absorben carbono, nitrógeno y sales inorgánicas de la materia orgánica para llevar a cabo el metabolismo y producir biogás. La excreta humana contiene estos elementos, por lo que el excremento en las aguas residuales domésticas se puede utilizar como material de fermentación. La siguiente tabla 5 muestra el promedio anual de excreción de heces humanas en aguas residuales.

**Tabla 5** Excreción promedio anual de estiércol humano (adulto) en aguas residuales

Excreción diaria ( kg )	Contenido de humedad ( % )	Salida diaria de orina. ( kg )	Contenido de humedad ( % )	Desplazamiento total anual (kg de materia seca)
0.5	80	1	99.6	37.96

#### - La temperatura.

La temperatura es un factor externo importante para la fermentación del biogás. Cuando la temperatura es adecuada, los microorganismos se propagan vigorosamente, la actividad es fuerte, la tasa de descomposición anaeróbica y la generación de metano es rápida y la producción de gas es mayor.

En general,  $55^{\circ}\text{C} \pm 3^{\circ}\text{C}$  es la fermentación de alta temperatura;  $35^{\circ}\text{C} \pm 3^{\circ}\text{C}$  es la fermentación de temperatura media;  $21^{\circ}\text{C} \pm 9^{\circ}\text{C}$  es la fermentación de temperatura normal; por debajo de  $10^{\circ}\text{C}$  es la fermentación de baja temperatura. La fermentación de alta temperatura produce el gas más rápido. Por lo tanto, el factor clave para nuestra utilización industrial de aguas residuales urbanas es cómo garantizar la fermentación de las materias primas en fermentación a alta temperatura o fermentación a temperatura media.

#### - Otros factores.

La concentración de materia seca de las materias primas de fermentación, el pH, el ambiente anaeróbico estricto y la agitación adecuada también son vínculos importantes en la producción del biogás.

### 4.2 Estimación de la producción del biogás en aguas residuales urbanas (1 millón de habitantes)

A continuación, calcularemos el biogás diario de una ciudad con una población de un millón en combinación con las Tablas 4 y 5.

**Tabla 6** Cálculo de la producción del biogás en aguas residuales urbanas (1 millón de habitantes)

Temperatura	Inóculo	Excreción diaria (materia seca kg)	Producción diaria de biogás. ( m <sup>3</sup> )	Contenido de metano ( % )
Fermentación de alta temperatura 55°C±3°C	50	104000	1051	70
Fermentación de temperatura media. 35°C±3°C	50	104000	876	68
Fermentación de temperatura normal 21°C±9°C	50	104000	832	66

Por el análisis anterior, se sabe que el excremento en las aguas residuales domésticas es un tipo de energía de biomasa, y es completamente factible producir biogás como materia prima de fermentación, como lo demuestra la tecnología de la estanque del biogás que se promueve actualmente en el pueblo de China. Además, muchos países de Europa occidental, como Noruega, Suecia y otros países, también han utilizado esta tecnología para lograr la autosuficiencia en el suministro de gas urbano. Si podemos utilizar de manera integral las aguas residuales urbanas y la basura doméstica para producir biogás, creo que en un futuro próximo, el gas vivo de los residentes urbanos será parcial o totalmente autosuficiente.

#### **-Uso de residuos del biogás.**

El residuo del biogás es la escoria del fondo producida por la fermentación anaeróbica de varias sustancias orgánicas, como los desechos humanos y animales. Debido a la fermentación anaeróbica de la materia orgánica, además del carbono, el hidrógeno, el oxígeno y otros elementos gradualmente descompuestos en metano y dióxido de carbono y otros gases, los nutrientes restantes se retienen básicamente en el residuo después de la fermentación Tabla 7.



**Tabla 7** Principales componentes del residuo del biogás.

Muestra	Materia orgánica ( % )	Ácido húmico ( % )	Nitrógeno ( % )	fósforo ( % )	Potasio ( % )
Residuos de biogas	30-50	10-20	0.8-2	0.4-1.2	0.6-2

Después de que las aguas residuales domésticas de los residentes urbanos se fermentan para producir biogás y se deshidratan, el material restante es residuo del biogás. La materia orgánica y el ácido húmico en los residuos del biogás juegan un papel importante en la mejora del suelo. Los elementos como el nitrógeno, el fósforo y el potasio pueden satisfacer las necesidades de la producción de cultivos. Las materias primas no descompuesta pueden continuar fermentando y liberando nutrientes en las tierras agrícolas.

Como un residuo del biogás fertilizante, se puede usar en proporción al fertilizante químico, y también se puede usar solo en lugar de fertilizante químico. Al mismo tiempo, el empapado de lodos del biogás y la aplicación foliar también pueden aumentar la tasa de germinación de las semillas, promover el crecimiento de las plantas y prevenir plagas y enfermedades. Por lo tanto, la producción industrial y el uso de residuos del biogás y la mezcla del biogás sentarán una base sólida para la agricultura verde ecológica.

#### **4.3 Recuperación indirecta del biogás a partir de la digestión anaerobia de lodos.**

La recuperación indirecta del biogás es la producción del biogás por los lodos producidos por la planta de tratamiento de aguas residuales. Como producto final del tratamiento de aguas residuales domésticas e industriales, los lodos son ricos en biogás, energía y materia orgánica. Se entiende que China tiene cerca de 2.000 plantas urbanas de tratamiento de aguas residuales en 2015, con una capacidad de procesamiento diario de casi 80 millones de toneladas y una producción diaria de alrededor de 80.000 toneladas de lodos húmedos. Por lo tanto, el uso efectivo del biogás en lodos de plantas de tratamiento de aguas residuales municipales e industriales es de gran importancia para mejorar la calidad de los

gases de escape, ahorrar energía y reducir los costos operativos.

### -Uso efectivo del biogás energético.

Con el desarrollo y la aplicación de varios reactores anaeróbicos de alta eficiencia y la acumulación continua de la experiencia de construcción y operación de ingeniería del biogás, la capacidad de China para producir biogás está aumentando. Si bien la producción del biogás está aumentando, cómo usarla de manera efectiva es un tema importante. La utilización de la energía del biogás se realiza principalmente a través de la conversión de energía para convertirla en la energía térmica y eléctrica requerida para el proceso de producción. Como se muestra en la Tabla 8, el principio de realizar un uso eficiente del biogás es la "utilización en sitio" y la "combinación de calor y electricidad".

**Tabla 8** Uso efectivo del biogás

Ejemplo de aplicación	Equipo relacionado	Fuente de biogás	uso	Beneficio	Características
Tianfang Pharmaceutical Co., SA.	Caldera de biogás	Producción de antibióticos residual	Secado de heces	Ahorro de carbón que quema 5.5t / d, costos de producción 10,800 yuanes / año.	El sistema es simple en composición, alto en tasa de utilización de energía (aproximadamente 70% a 90%), conveniente en mantenimiento y gestión, maduro en el proceso de aplicación, pero grande en emisiones de contaminantes del aire, y existe una contradicción entre el desequilibrio del suministro de calor y la demanda.
Jiannanchun Group Co., Ltd.	Equipos de combustión directa de biogás.	La elaboración de residuos	Vino producción de combustión directa.	Con una producción anual de 2,64 millones de m <sup>3</sup> de biogás, un aumento anual de 1,71 millones de yuanes.	Puede resolver la contradicción entre el suministro de calor y la demanda de la caldera de biogás y tiene un alto beneficio económico, pero el motor está limitado por el ciclo de Carnot y la eficiencia es baja.
Jiangsu Taicang Xintai Alcohol Co., Ltd.	Generador de biogás	Destiladoras	Suministro eléctrico en planta.	La producción anual de biogás es de 12 millones de m <sup>3</sup> , el gas para la generación de energía es de 5 millones de m <sup>3</sup> y el ingreso neto anual de la generación de energía es de 2,01 millones de yuanes.	Alta eficiencia, no está sujeta al ciclo de Carnot, baja emisión de contaminantes, bajo nivel de ruido, fácil mantenimiento y administración, pero alta inversión de capital y costos operativos, falta de experiencia operativa a largo plazo.
EDAR de 200,000 t / d en Japón.	Pila de combustible de biogás	Lodo	Suministro eléctrico en planta.	El suministro de energía anual es de 5,28 millones de kW·h, y el costo de la electricidad es de 73,92 millones de yenes / año, y el beneficio anual es de 11,44 millones de yenes.	Combinando calor y energía, la utilización total de la energía de biogás es la más alta, pero el sistema es complejo.
EDAR de Gaodianbei de Beijing.	Motor de combustión interna de biogás + unidad de recuperación de calor residual + grupo electrógeno	Lodo	Calentamiento de fangos en planta.	Se espera que la generación anual de energía alcance los 27 millones de kWh (con un valor de alrededor de 16 millones de yuanes), con una producción de calor de unos 28 mil millones de kcal (con un valor de alrededor de 4 millones de yuanes) y un valor de producción anual de 20 millones de yuanes.	

Hay muchas formas de utilizar el biogás. Al elegir, debemos prestar atención a las características y condiciones de la fábrica o a la planta de tratamiento de aguas residuales, y adaptarnos a las condiciones locales. Por ejemplo, Meng Qingjie etc. Señalaron que la generación de energía con biogás es la mejor solución para la utilización del biogás en plantas de alcantarillado grandes y medianas, y el biogás se utiliza como un esquema de utilización del biogás para plantas de tratamiento de aguas residuales pequeñas. Además, cuando se recupera y utiliza energía del biogás a partir de aguas residuales orgánicas con alto contenido de azufre, se debe considerar cuidadosamente la selección de procesos, el

control de parámetros, los procesos de pretratamiento, etc., incluso se debe considerar si la energía del biogás se recupera de dichas aguas residuales, porque se trate de un tratamiento previo del sulfato o de la desulfuración del biogás, puede aumentar considerablemente el costo de la producción del biogás.

## **5. Tecnología de celda de combustible microbiana.**

La celda de combustible microbiana (MFC) es un dispositivo que utiliza tecnología electroquímica para convertir los microorganismos en energía eléctrica. Puede procesar aguas residuales al mismo tiempo que convierte contaminantes orgánicos en aguas residuales en energía eléctrica.

En 1911, el botánico británico Potter experimentó con levadura y *E. coli*, anunciando el uso de microorganismos para generar electricidad. La investigación con células de biocombustible comenzó con celdas de combustible microbianas, que son dispositivos que utilizan catalizadores microbianos para convertir la energía química en energía eléctrica. En 1984, los científicos estadounidenses diseñaron una batería bacteriana para una nave espacial cuyos electrodos eran de la orina de los astronautas y las bacterias vivas, pero las células bacterianas en ese momento eran menos eficientes. A fines de la década de 1980, la generación de energía bacteriana había logrado importantes avances, y los químicos británicos permitieron que las bacterias descompongan las moléculas en la batería para liberar electrones y avanzar hacia el ánodo para generar electricidad. Añaden ciertos compuestos aromáticos, como los colorantes, a la solución de azúcar como diluyentes para aumentar la capacidad del sistema biológico para transportar electrones. Durante la generación de energía de las bacterias, es necesario inflar continuamente la batería y agitar la mezcla de la solución de cultivo bacteriano y el óxido. Teóricamente, con la batería bacteriana, se pueden obtener 1352930 coulombs de electricidad por cada 100 g de azúcar, y la eficiencia puede alcanzar el 40%, mucho más alta que la eficiencia de la batería actualmente en uso y con un 10% de potencial para continuar el desarrollo. La gente está contemplando el establecimiento de una central eléctrica bacteriana. Por ejemplo, una solución de cultivo bacteriano basada en un cubo cuadrado de 10 m puede construir una central eléctrica bacteriana de 1000 kw con un consumo de 200 kg por hora. El costo de generación de energía es mayor, pero esto es un par. Las centrales eléctricas "verdes" no contaminantes del medio ambiente y, con el desarrollo de la tecnología, pueden utilizarse

hidrolizados de residuos orgánicos, como aserrín, paja y hojas, en lugar de líquidos de azúcar.

MFC tiene una perspectiva de aplicación muy amplia en algunos campos de tecnología de alto nivel. El ánodo se inserta en el sedimento del lecho marino, y el cátodo se coloca en el agua de mar adyacente para recolectar la corriente submarina natural generada por el metabolismo microbiano, que puede proporcionar energía para monitorear los instrumentos del barco y del barco en las condiciones de poca luz del fondo marino. Apoyo a proyectos. El tamaño de la potencia MFC submarina depende de factores como el diseño del electrodo, la composición del sedimento, la temperatura y el contenido de oxígeno en el agua de mar. MFC también tiene perspectivas de aplicación en la transmisión inalámbrica de datos en áreas remotas y reciclaje de espacio para estaciones espaciales. Recientemente, un aspecto muy activo del campo de MFC ha sido el desarrollo de tecnologías para resolver suministros de energía, como dispositivos de implantes humanos como marcapasos cardíacos. MFC puede usar fluidos corporales o metabolitos en la sangre, como la glucosa y el ácido láctico, como combustible para generar electricidad, pero todavía hay muchos problemas técnicos que requieren más estudios.

En comparación con las celdas de combustible convencionales, MFC tiene una tasa de conversión de energía más alta, no necesita una unidad de tratamiento de gas adicional y, cuando se combina con el proceso de tratamiento de aguas residuales, puede obtener una tasa de eliminación de DQO más alta que la tecnología de producción de hidrógeno por fermentación de aguas residuales. Un nuevo y atractivo tipo de fuente de energía eléctrica. MFC combina las características de un tanque anaeróbico y un tanque de aireación de una planta de tratamiento de aguas residuales. La cámara de ánodo es una zona de fermentación anaeróbica, y el compartimento del cátodo es un entorno aeróbico, pero no requiere aireación, lo que no solo ahorra costos sino que también genera electricidad. Muchos estudios han demostrado que la tecnología MFC tiene el potencial de manejar aguas residuales industriales, aguas residuales domésticas, aguas residuales de granjas de animales y aguas residuales sintéticas. MFC es esencialmente un sistema que captura los electrones producidos por un microorganismo durante su metabolismo y dirige a los electrones a producir electricidad. Los electrones generados por el biofilm anódico que oxida la materia orgánica se transmiten directamente al electrodo, donde el electrodo funciona como un aceptor de electrones. Por lo tanto, la degradación de la materia orgánica por MFC es diferente del proceso de tratamiento biológico aerobio y del proceso de

tratamiento biológico anaeróbico. En comparación con el proceso de tratamiento biológico aeróbico de aguas residuales, el rendimiento de lodos de MFC es solo una quinta parte del proceso de tratamiento biológico aeróbico, lo que reduce en gran medida el costo de eliminación de lodos. En comparación con el proceso de tratamiento biológico anaeróbico convencional, el producto de conversión de energía de MFC es una energía eléctrica que es fácil de utilizar por las personas y puede operar a temperatura normal, y por lo tanto tiene una ventaja. La salida de potencia de salida de un MFC depende de la cantidad y la velocidad de los electrones transferidos por el sistema y la diferencia de potencial entre el ánodo y el cátodo. La superioridad potencial de MFC ha hecho que las personas presten atención a sus perspectivas de desarrollo, lo que hace que la tecnología MFC se convierta en un punto de acceso para la investigación en el campo ambiental. En una celda de combustible microbiana, los microorganismos descomponen la materia orgánica en sustancias inorgánicas bajo la acción de un catalizador, y la energía química se convierte en energía eléctrica junto con la conversión de sustancias. Las aguas residuales domésticas y las aguas residuales industriales contienen muchas sustancias orgánicas, y estos microorganismos están disponibles. Las células de combustible microbianas consumen materia orgánica en las aguas residuales y realizan la conversión de energía a través del metabolismo biológico. Es un tipo de energía verde y sus características son las siguientes:

- Amplia gama de materias primas: se puede utilizar una variedad de sustratos.
- Las condiciones son suaves: seguras y confiables
- Protección del medio ambiente y libre de contaminación: el único producto agua
- No es necesario transferir energía: realice la conversión de bioenergía en energía eléctrica.
- La energía puede alcanzar la circulación.
- Se puede utilizar en el tratamiento de lodos y aguas residuales, convirtiendo los desechos en tesoros, ahorrando energía y reduciendo las emisiones.

### **5.1 Principio de la celda de combustible microbiana**

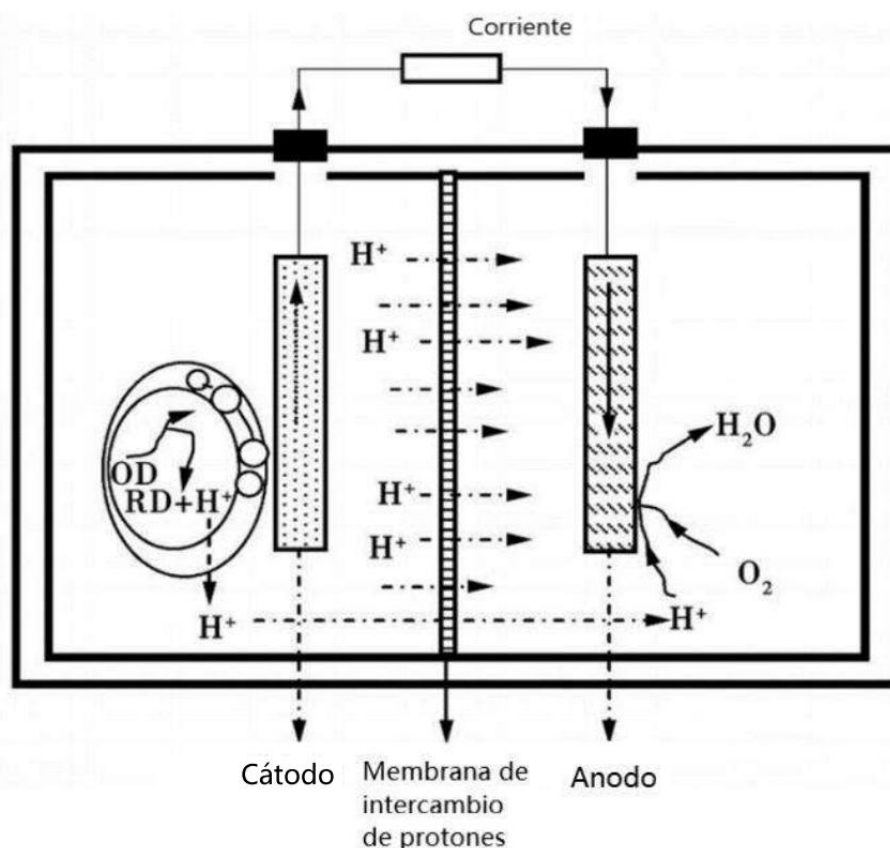
Todos sabemos que los microbios tienen la capacidad de degradar la materia orgánica, y la energía cambia a medida que la materia orgánica se transforma. Los microorganismos transfieren los electrones generados por la reacción redox al cátodo a través de un circuito externo. Este proceso está acompañado por la generación de corriente, por lo que lo llamamos una celda de combustible microbiana (MFC).

MFC es esencialmente un sistema que captura los electrones producidos durante el metabolismo microbiano y dirige a los electrones a producir electricidad. La salida de potencia de un MFC depende de la cantidad y la velocidad de los electrones transferidos por el sistema y la diferencia de potencial entre el ánodo y el cátodo. Dado que MFC no es un sistema de motor térmico, evita las limitaciones termodinámicas del ciclo de Carnot. Por lo tanto, en teoría, MFC es el dispositivo más eficaz para convertir energía química en energía eléctrica, y es probable que la eficiencia máxima sea cercana al 100%. Un dispositivo MFC típico, que se muestra en la Figura 2, consiste en una región de cátodo y una región de ánodo con una separación de membrana de intercambio de protones entre las dos regiones.

El principio de funcionamiento es el siguiente: el ánodo y el cátodo de la MFC son materiales conductores, la superficie del ánodo está unida con microorganismos, el catalizador químico está fijo en el cátodo o el microorganismo también está unido. El ánodo externo (por ejemplo, una resistencia) está conectado al ánodo y al cátodo de la batería a través de cables. Internamente, las sustancias orgánicas en la superficie de la región del ánodo o en el lodo, como la glucosa, el ácido acético, los polisacáridos y otras sustancias orgánicas degradables, producen dióxido de carbono, protones y electrones bajo la acción de los microorganismos del ánodo. Los electrones se transfieren al electrodo a través del intermedio o la membrana celular y llegan al cátodo a través del circuito externo, los protones migran al cátodo a través de la solución y reaccionan con el oxígeno para producir agua, de modo que todo el proceso alcanza el equilibrio de la materia y la carga, y el aparato eléctrico externo también obtiene energía eléctrica. Dado que la región del ánodo debe ser un entorno anaeróbico, la función de la membrana de intercambio de protones en el medio de la batería es separar la materia orgánica y el oxígeno en la región del ánodo y la región del cátodo, respectivamente, mejorando así la eficiencia de conversión de los electrones MFC mientras se asegura una conducción eficiente de protones. En general, el principio de funcionamiento de MFC se puede dividir en los siguientes cinco pasos:

- Sustrato de oxidación. En un ambiente anaeróbico en una cámara de ánodo, los microorganismos oxidan los sustratos orgánicos para producir electrones, protones y metabolitos. Fórmula de reacción del ánodo:  $C_6H_{12}O_6 + 6H_2O \rightarrow 6CO_2 + 24H^+ + 24e^-$  ( $E^0 = 0.014V$ ).
- Reducción del ánodo. Los electrones generados se transfieren de las células microbianas a la superficie del ánodo para restaurar los electrodos.

- Transmisión electrónica de circuitos externos. Los electrones llegan al cátodo a través de un circuito externo.
- Migración de protones. Los protones ( $H^+$ ) producidos por la reacción del ánodo migran desde la cámara del ánodo a la superficie del cátodo.
- Reacción catódica. Los aceptadores de electrones (como  $O_2$ , etc.) reaccionan con protones y electrones del ánodo para reducir la superficie del cátodo. Fórmula de reacción catódica:  $6O_2 + 24H^+ + 24e^- \rightarrow 12H_2O$  ( $E^0 = 1.23V$ ).

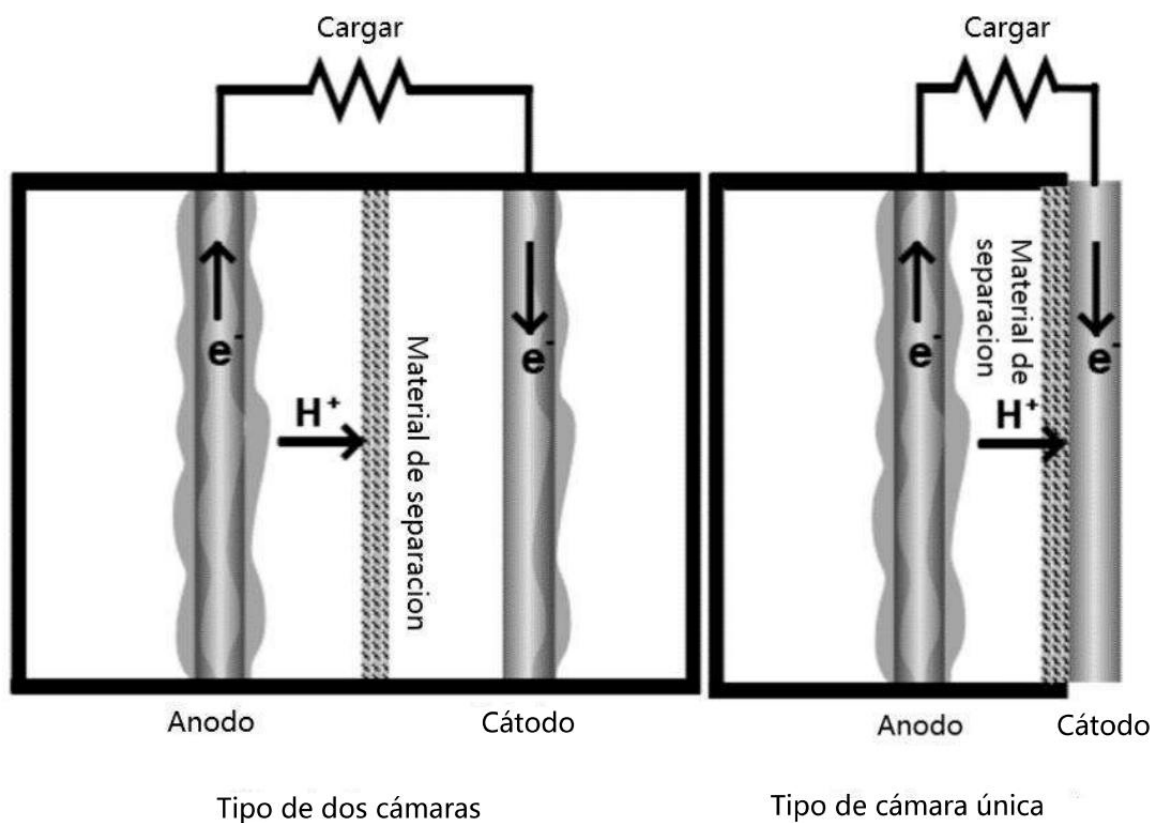


**Figura 2** Célula de combustible microbiana (MFC) y principio de funcionamiento.

Además, dependiendo del tipo de catalizador de cátodo, MFC se puede clasificar en un MFC de cátodo químico y un MFC de biocátodo. La superficie del sustrato de cátodo del cátodo químico MFC se carga con un catalizador químico o solo el propio sustrato de electrodo. Cuando el cátodo usa oxígeno como aceptor de electrones, su superficie generalmente está cargada con un catalizador químico. Cuando una sustancia fácilmente reducible, como el ferricianuro de potasio, se utiliza como aceptor de electrones, el cátodo no requiere un catalizador. Además, para materiales con una gran área de superficie específica (como carbón activado), no hay necesidad de soportar el catalizador y un buen



rendimiento de reducción de oxígeno. La superficie del biocátodo debe unirse a una biopelícula formada por microorganismos autótrofos que pueden reducir los aceptadores de electrones (como  $O_2$  o  $NO_3^-$ ). Cuando se usa oxígeno como aceptador de electrones, la cámara del ánodo es un entorno aeróbico, cuando se usa  $NO_3^-$  como aceptador de electrones, la cámara del cátodo es un ambiente deficiente de oxígeno y el cátodo puede realizar desnitrificación mientras genera electricidad. Por lo tanto, biocathode MFC tiene ciertas ventajas en el tratamiento del agua. Dependiendo de la configuración, la MFC se puede dividir en dos cámaras de tipo cámara y de una sola cámara. Según la presencia de microorganismos en el cátodo y el ánodo, la batería se puede dividir en biocathode, bioanode y biobipolar. El metabolismo de los microorganismos se descompone y sintetiza la materia orgánica, en este proceso los electrones se transfieren y el circuito se forma mediante cables para obtener la corriente. Como se muestra en la Figura 3.



**Figura 3** Tipo de dos cámaras y cámara única.

El MFC de dos cámaras tiene dos cámaras, una cámara de ánodo y una cámara de cátodo, separadas por un material de partición. Esta configuración es común en MFC biocátodo, MFC de cátodo químico con ferricianuro de potasio como aceptador de electrones, o MFC



con cátodo de inmersión con oxígeno como aceptador de electrones. El tipo de cámara única tiene solo una cámara de ánodo, y su cátodo se presiona junto con el material separador, por lo que también se le llama tipo "dos en uno". Esta configuración es común en MFC de cátodos químicos (comúnmente denominados MFC de cátodo de aire) que utilizan oxígeno como aceptador de electrones.

## **5.2 Estado y perspectivas de la tecnología.**

En la actualidad, el desarrollo de MFC se encuentra en una etapa temprana, y la mayor parte de la investigación aún se encuentra a nivel de laboratorio. El foco de la investigación aún se encuentra en la biología y la teoría de materiales de electrodos y la tecnología de un solo MFC. Muchos estudios se han centrado en las mejoras en el diseño de dispositivos MFC para lograr una mayor potencia de salida. Actualmente, la densidad de potencia de MFC es tres órdenes de magnitud más baja que las celdas de combustible químicas convencionales, en comparación con el proceso de producción de metano anaeróbico más maduro. También hay una gran brecha en la producción de energía. Por lo tanto, un estudio en profundidad de la capacidad de generación de energía microbiana de MFC y el mecanismo de transferencia de electrones al electrodo durante el metabolismo pueden ayudarnos a comprender mejor la interacción y la compatibilidad entre los materiales de transporte de electrones biológicos y los electrodos. La base del sistema y los materiales de los electrodos. Las primeras investigaciones sobre MFC se centraron en cómo aumentar la densidad de potencia de las baterías, por lo que los investigadores han desarrollado muchos materiales de alta eficiencia pero también costosos. Pero con el desarrollo de MFC en los últimos años, las personas tienen una voz más alta por la practicidad de MFC, y los investigadores están gradualmente conscientes del costo. De acuerdo con los datos, en el uso actual de MFC y el proceso de tratamiento de agua convencional para tratar la misma cantidad de aguas residuales, el costo unitario de MFC para el tratamiento de agua es varias veces a varias decenas de veces más que el proceso de tratamiento de agua convencional, por lo que la economía está lejos de Cumplir los requisitos prácticos. Por lo tanto, las limitaciones más importantes en el desarrollo de la tecnología MFC son la baja densidad de potencia y el alto costo de desarrollo. Aquí hay dos preguntas:

### **- Baja densidad de potencia de la batería**

De acuerdo con el principio general de la batería, su potencia de salida máxima

P<sub>max</sub> está determinada por la tensión del circuito abierto y la resistencia interna total R<sub>i</sub>.

$$P_{max} = \frac{E^2}{4R_i}$$

Donde:

P<sub>max</sub> : Potencia máxima ,

E : Energía de la batería ,

R<sub>i</sub> : Resistencia total cuando la resistencia interna es igual a la resistencia de carga del circuito externo

Cuando se determinan el donador de electrones y el aceptor de electrodos del cátodo MFC, E también se determina de modo que la densidad de potencia sea baja porque la resistencia interna es alta. Desde la perspectiva del mecanismo de resistencia interna, la resistencia interna de MFC se puede dividir en tres partes: resistencia interna óhmica, resistencia interna activada y resistencia interna de transferencia de masa.

La resistencia interna óhmica consta de dos partes. Una parte es la resistencia (R<sub>e</sub>) transmitida por electrones en el material del electrodo. Según la ley de Ohm, R<sub>e</sub> está relacionada con la conductividad eléctrica del material del electrodo y también con la distancia a la que viajan los electrones en el material del electrodo y el área de sección transversal del canal de transferencia. Entre ellos, R<sub>e</sub> tiene una correlación negativa con la conductividad y el área de sección transversal del canal de transmisión, y se correlaciona positivamente con la distancia de transmisión. La segunda parte es la transferencia de protones en solución y la resistencia (R<sub>i</sub>) encontrada al pasar a través del material separador. Se relaciona con el tipo y la concentración de electrolito en la solución, la distancia de transferencia de protones (espaciado del electrodo), el área de la sección transversal del canal de transferencia (generalmente igual al área del material de partición y las propiedades del material separador. La correlación negativa se relaciona positivamente con la distancia de transferencia de protones y la resistencia del material separador a los iones en la solución. La resistencia interna óhmica no cambia con la corriente durante la operación de MFC. Para el pequeño reactor utilizado en el laboratorio

Por lo tanto, debido al pequeño tamaño del electrodo y la adición de una mayor concentración de sistema de tampón fosfato en el catolito y el anolito, la resistencia específica de la resistencia interna óhmica en la resistencia interna total no es alta. La proporción en la resistencia interna total aumentará significativamente.

La activación de la resistencia interna se debe a la aparición de anodización y reducción catódica durante el proceso de producción de MFC, lo que conduce a una cierta pérdida de energía. Para los ánodos y los biocátodos, la magnitud de la resistencia interna de activación está relacionada con el número y el tipo de microorganismos que producen electricidad. Primero, cuanto mayor sea el número de microorganismos electrogénicos, menor será la resistencia interna de activación del ánodo. En segundo lugar, también existe una correlación negativa entre la resistencia interna de activación y la proporción de microorganismos microbianos de alta eficiencia. En la actualidad, la comprensión de los investigadores de los microorganismos electrogénicos es todavía muy limitada. Los anodianos conocidos actualmente como "Geobacter" y "Shewanella" tienen una mayor actividad electroquímica. Sin embargo, generalmente debido a que la composición del sustrato utilizado en el experimento es complicada, o la fuente de inoculación de las bacterias electrógenas es una variedad mixta, la comunidad microbiana en el MFC tiene diversidad y el número de microorganismos directamente relacionados con la generación de electricidad es limitado, lo que hace que el conjunto La actividad de la biopelícula producida no es lo suficientemente alta. En MFC, el entorno de crecimiento del microorganismo electrógeno se ve afectado tanto por las características de la superficie del electrodo como por la matriz. Cuando se determina el objeto tratado (matriz), el área superficial del electrodo por unidad de volumen y las características superficiales del electrodo determinan el área de unión del microorganismo electrógeno y el espesor de la biopelícula, respectivamente, y se convierten así en un factor importante que afecta a la biomasa. Para los cátodos químicos, la resistencia interna de activación está relacionada con el tipo de catalizador. Pt se conoce actualmente como un catalizador de cátodo con buen rendimiento, pero debido a su alto precio, no es adecuado para un gran número de aplicaciones. Dado que la solución tiene una capa límite en la superficie de la biopelícula, la resistencia interna de transferencia de masa es causada principalmente por la resistencia de los reactivos reaccionados por el electrodo y el producto en la capa límite. La resistencia interna de transferencia de masa no es obvia en el caso de alta concentración de sustrato y baja corriente. En el caso de una corriente grande, la resistencia interna de transferencia de

masa puede convertirse en un factor importante que limita el rendimiento de MFC.

### **-Alto costo**

En los últimos años, los investigadores han mejorado significativamente su rendimiento eléctrico optimizando su configuración MFC y utilizando materiales de alto rendimiento. Sin embargo, existe relativamente poca preocupación por el costo de los materiales utilizados. El cátodo químico convencional MFC utiliza un metal noble Pt como catalizador de cátodo. Aunque se puede obtener un buen rendimiento de generación de energía, el alto costo de Pt hace que el costo general de MFC sea demasiado alto para ser aplicado a la situación real a gran escala. El costo del cátodo representa más del 90% del costo total de MFC. Para reducir el costo del cátodo, los investigadores utilizaron un microorganismo (biocátodo) o un catalizador no Pt de bajo costo en lugar de Pt para catalizar la reacción de reducción del cátodo. Sin embargo, el costo de MFC sigue siendo alto después de reducir el costo del cátodo. Se estima que el mismo costo de remover 1 kg de DQO del cátodo de aire MFC es 40 veces mayor que el del dispositivo metanogénico anaeróbico convencional. Por lo tanto, desde el punto de vista práctico, el problema actual del costo excesivo de MFC es particularmente prominente.

Los materiales de electrodos, materiales separadores y materiales de colector son los principales costos de MFC. El costo del material del electrodo representa la mitad del costo total. Dado que el material del electrodo en sí mismo requiere una buena conductividad eléctrica, biocompatibilidad, resistencia mecánica y estabilidad química, existen grandes limitaciones en la selección del material. Los materiales que cumplen con los requisitos anteriores son generalmente costosos y no se pueden aplicar a gran escala. Los materiales de electrodos de menor costo generalmente no pueden cumplir con los requisitos anteriores, por lo que deben modificarse para mejorar su rendimiento. Para el material de separación, la costosa membrana de intercambio de protones ha sido reemplazada por la membrana de intercambio iónico, y el costo se reduce, pero su costo sigue siendo alto debido a la gran cantidad de uso. Además, para promover su aplicación práctica, el MFC se está volviendo cada vez más grande, y es indispensable para los materiales colectores de metal con buena resistencia a la corrosión, lo que también aumentará el costo por unidad de volumen de los dispositivos MFC.

### 5.3 Perspectiva

Las celdas de combustible microbianas han recibido una gran atención debido a su simplicidad de operación, limpieza y eficiencia. En los últimos años, la investigación sobre MFC ha avanzado mucho en comparación con estudios anteriores. MFC no solo realiza el tratamiento de aguas residuales, sino que también produce electricidad, así como biosensores y otras aplicaciones. Para el futuro desarrollo de MFC, necesitamos poner más energía en los siguientes dos puntos:

- La potencia de salida del MFC diseñado actualmente aún está lejos de los requisitos reales de la aplicación. Puede optimizar el material del electrodo al detectar microorganismos electrógenos eficientes y diseñar un reactor más razonable para aumentar la potencia de salida.
- Reducir los costos. En la actualidad, el costo de los electrodos utilizados en el laboratorio representa más de la mitad del costo de MFC, por lo que la reducción del costo de los electrodos se ha convertido en la clave para resolver el problema. Primero, es necesario cribar materiales de electrodos económicos y eficientes, como los materiales de carbono tratados con agua de bajo costo, como el carbón activado, que se espera que se usen en grandes cantidades en MFC. En segundo lugar, deberíamos usar un material metálico conductor y resistente a la corrosión como el material que lleva corriente. También debemos prestar atención a reducir la reducción de costos mientras aseguramos el rendimiento del MFC, optimizando el proceso de fabricación y la estructura de la batería para reducir el costo sin reducir el rendimiento de la batería, a fin de mejorar realmente el rendimiento de la batería.

## 6. Comparación de tres bioenergías

La fermentación anaeróbica para producir biogás, la producción de hidrógeno por fermentación anaeróbica y la celda de combustible microbiana (MFC) son tres tecnologías importantes para realizar la recuperación de aguas residuales sobre la base del tratamiento. La tecnología del biogás de fermentación anaeróbica ha madurado en todo el mundo, y muchas plantas de tratamiento de aguas residuales actualmente tienen plantas de fermentación anaeróbica para producir metano y usarlo para la generación de energía o el

calentamiento en plantas de aguas residuales. La producción de hidrógeno por fermentación anaeróbica y las células de combustible microbianas (MFC) son tecnologías que han experimentado importantes avances tecnológicos en los últimos años, pero estas dos tecnologías aún se encuentran en la etapa de investigación de laboratorio, y no pueden resolverse hasta que se hayan resuelto los problemas de capacidad y costo. Aplicarlo a la vida real a gran escala. Sin embargo, si se descuida el costo, solo se pueden usar tres tecnologías para tratar aguas residuales orgánicas de alta concentración y fácilmente degradables desde la perspectiva de mejorar la productividad. Si se tratan aguas residuales refractarias de alta concentración, a partir de los resultados de la investigación actual, el biogás de fermentación anaeróbica y la tecnología MFC son más adecuadas para el tratamiento y la perspectiva de la aplicación es relativamente amplia.

Las aguas residuales urbanas tienen un gran flujo de aguas residuales y abundante materia orgánica, pero si es adecuado para la fermentación anaeróbica y la producción de hidrógeno para MFC siempre ha sido un tema de debate entre los investigadores. Si se analiza desde la perspectiva del tratamiento del agua, el tratamiento de las aguas residuales domésticas urbanas debe basarse en una alta eficiencia, rapidez y cumplimiento. El uso de estas dos tecnologías para el tratamiento previo anaeróbico de las aguas residuales prolongará el tiempo total de residencia de las aguas residuales en la planta de tratamiento. La huella es suficiente para manejar el rendimiento. Además, el consumo excesivo de materia orgánica puede afectar los posteriores efectos biológicos de eliminación de nitrógeno y fósforo. Desde la perspectiva de la capacidad, la baja concentración de DQO de las aguas residuales domésticas urbanas afectará la eficiencia de la producción de hidrógeno y la producción de electricidad, y sus complejos componentes de calidad del agua también afectarán la sostenibilidad y la estabilidad de la operación del equipo. Se puede ver que las aguas residuales domésticas urbanas no son adecuadas para la producción de hidrógeno fermentativo y la producción de MFC.

Por supuesto, la producción de hidrógeno por fermentación anaeróbica y MFC como una nueva tecnología de recuperación de energía para el tratamiento de aguas residuales, las perspectivas de desarrollo de estas dos tecnologías son ciertas. Y hay muchas similitudes entre los problemas de los dos y la dirección de la investigación. Por ejemplo, en los

problemas existentes, la baja productividad es un cuello de botella que restringe el desarrollo de ambos, en la dirección de la investigación, la mejora de las teorías relevantes, la detección y transformación de microorganismos de alta eficiencia, la investigación y aplicación de medidas de mejora biológica y el reactor de flujo continuo de alta eficiencia. El diseño de optimización, etc., es el foco de futuros trabajos de investigación. Además, muchos estudiosos comenzaron a estudiar la combinación de las dos tecnologías. Por ejemplo, el uso de agua residual de alimentos como sustrato y la conexión de MFC después de la unidad de producción de hidrógeno de fermentación no solo aumenta de manera efectiva la potencia de salida del MFC, sino que también mejora la tasa de recuperación de energía.

## 7. Conclusión

A través de la introducción de varias tecnologías para recuperar energía de las aguas residuales, podemos saber que la tecnología de recuperación de energía más utilizada y más madura del mundo es la fermentación anaeróbica, que es la tasa más alta de recuperación de energía en las aguas residuales. Uno de los medios. Las tecnologías de producción de hidrógeno y MFC están aún en su infancia, y todas enfrentan varios problemas. La potencia de salida de MFC es relativamente baja y su costo no se ha tenido en cuenta de manera estricta. En comparación con los sistemas del biogás de alta eficiencia existentes (como los reactores UASB), la potencia de salida de MFC solo supera los 8500 mW / m<sup>2</sup>. Teóricamente es factible lograr este poder, y solo es necesario optimizar la configuración de MFC y los microorganismos. Pero incluso con esta potencia, MFC sigue siendo difícil de competir con las celdas de combustible químico porque las salidas de potencia de las celdas de combustible químico existentes son todas del orden de mW / cm<sup>2</sup>. Por lo tanto, MFC solo se puede utilizar como un complemento a las celdas de combustible químico en el futuro. Para tener valor práctico, la tasa de producción de hidrógeno se debe aumentar a 60% -80%. Para lograr este valor, se deben utilizar medios adicionales, como la asistencia a la producción de hidrógeno con MFC. El uso del hidrógeno enfrenta el problema de cómo acoplarse orgánicamente con las celdas de combustible (o MFC), y la purificación del hidrógeno es un problema urgente que debe resolverse. A pesar de los muchos problemas, con el desarrollo de las tecnologías de producción de biotecnología, MFC y biohidrógeno se convertirá en una parte integral de las tecnologías de energía

renovable, al igual que la tecnología del biogás anaeróbica.

Las tres tecnologías anteriores para desarrollar energía renovable pueden reducir la dependencia de las fuentes de energía tradicionales y pueden controlar y reducir la contaminación ambiental. También son una de las tecnologías importantes para lograr el desarrollo energético sostenible en el mundo. Debemos aumentar nuestra investigación sobre estas tecnologías para que puedan actualizarse a mayores tasas de conversión y se apliquen al mundo real.

## 8. BIBLIOGRAFÍA

[1]Ren Nan-qi , Li Yong-feng , Zheng Guo-xiang , et al. Bio - hydrogen I —The progress of found mental research [J].Advance in Earth Sciences , 2004 , 19(S) : 537-540.  
( in Chinese )

[2] Gong Man-li , Ren Nan-qi , Li Yong-feng , et al. Compari - son of biohydrogen production capacity from different typesof fermentation in continuous-flow reactor [J]. Journal of Harbin Institute of Technology , 2006 , 38 ( 11 ) : 1826-1830. ( in Chinese )

[3] Wang Yong , Ren Nan-qi , Sun Yu-jiao , et al. Analysis on the mechanism and capacity of two types of hydrogen production-ethanol fermentation and butyric acid fermentation[J]. Acta Energiae Solaris Sinica , 2002 , 23 ( 3 ) : 366-373. ( in Chinese )

[4] Song Jia -xiu , Ren Nan -qi , Duan Zhi -jie. Establishment and comparison for the predominant hydrogen productionacidogenic fermentation types[J]. Water & Wastewater Engineering , 2006 , 32(S) : 79-83. ( in Chinese )

[5] Wang Ji -hua , Zhao Ai -ping. The research progress and application prospect of biohydrogen production technology [J]. Research of Environmental Sciences , 2005 , 18



( 4 ) : 129-135. ( in Chinese )

[6] Tang Gui-lan , Sun Zhen-jun , Li Yu-ying. Progress in microbial fermentative hydrogen production and hydrogen producing microorganisms [J]. Transactions of the CSAE , 2007 , 23 ( 12 ) : 285-290. ( in Chinese )

[7] Luo Huan , Huang Bing , Bao Yun. Research and development of hydrogen bio - production with immobilized microorganism technology[J]. Acta Agriculturae Jiangxi , 2007 , 19 ( 4 ) : 89-93. ( in Chinese )

[8] Li Bai-kun , Lv Bing-nan , Ren Nan-qi. The bio-producing hydrogen ability and coordination of anaerobic active sludge and hydrogenogenic bacteria [J]. Acta Scientiae Circumstantiae , 1997 , 17 ( 4 ) : 459-462. ( in Chinese )

[9] Lin C. Y. and Jo C. H. Hydrogen production from sucrose using an anaerobic sequencing batch reactor process[J]. Chem. Technol. Biotechnol. 2003(78): 678—684.

[10] Yu H .Q ., Zhu Z. H., Hu W .R ,etal. Hydrogen production from rice winery wastewater in an upflow anaerobic reactor by using mixed anaerobic culture[J]. Hydrogen Energy. 2002(27): 1359—1365.

[11] Evvyemie D., Yamazaki S., Moritnoto K.,etal. Identification and characterization of Clostridium paraputrificum M-21, a chitinolytic mesophilic and hydrogen-producing bacterium[J]. Biosci.Bioeng. 2000,89(6): 596—601.

[12] Fang H .H .P. and Liu H. Effect of pH on hydrogen production from glucose by a mixed culture[J]. Bioresource Technology. 2002(82): 87—93.

[13] Chen C.C. and Lin C .Y. Start-up anaerobic hydrogen production reactors seeded with sewage sludge[J]. Acta Biotechnol. 2001,21(4): 371—379.

[14] Liu H. and Fang H.H.P. Hydrogen production from wastewater by acidogenicb granular sludge. War.Sci.Tech. 2003,47(1): 153—158.

- [15] Lee K. S., Lo Y. S., Lo Y. C., et al. H<sub>2</sub> production with anaerobic sludge using activated-carbon supported packed-bed bioreactors[J]. *Biotechnology Letters*. 2003(25): 133—138.
- [16] Zhou Hongbo, Ralf C. R., Chen Jian, et al. Oxidation-reduction potential control in acid-producing phase and its effect on glucose anaerobic fermentation products[J]. *China Biogas*. 2000,18(4): 20-23.
- [17] Yenigun O., Kizilgun F. and Yilmazer G. Inhibition effects of zinc and copper on volatile fatty acid production during anaerobic digestion[J]. *Environ. Technol.* 1996(17): 1269—1274.
- [18] Fang H. H. P., Chen T. and Chan O.C. Toxic effects of phenolic pollutants on anaerobic Benzoate-degrading granules[J]. *Biotechnol. Letters*. 1995, 17(1): 117—120.
- [19] Lay J. J., Li Y. Y. and Noike T. The influence of pH and ammonia concentration on the methane production in high-solids digestion processes[J]. *Res.* 1998,70(5): 1075—1082.
- [20] Lin Rong -chen , Zhou Wei -li , Lin Wen -bo , et al. Two systems of biogas generation in municipal wastewater treatment plant[J]. *Urban Environment & Urban Ecology* , 1999 , 12 ( 3 ) : 57-59. ( in Chinese )
- [21] Chen deming. Accelerating the Development and Utilization of Biomass Energy[J]. *China Economic Weekly*, 2006,34: 13-13.
- [22] Ye Qian , Li Xue ya. Microbe and clean energy[J]. *China Resources Comprehensive Utilization* , 2006 , 24 ( 6 ) : 15-17. ( in Chinese )
- [23] Li Changsheng. *Practical Technology of Farm Biogas*, Jindun Press, 2006, 8
- [24] Zeng Yichun. *Comprehensive Utilization Technology of Rural Household Biogas*, China Agriculture Press, 2007, 7
- [25] Song Xuan. Comparison of development of ecological sanitation (drainage) system at home and abroad, water supply and drainage, 2003, 9 ( in Chinese )

- [26] Ning Ping, Chen Jianzhong. Course on the treatment and disposal of biogas residue [M], 2005 ( in Chinese )
- [27] Yang Gu , Wan Xue-cheng , Zhao Zheng-wei. Application and treatment of biogas - renewable energy from the treatment of antibiotic wastewater[J]. Mechanical and Electrical Information , 2007 , ( 23 ) : 39-42. ( in Chinese )
- [28] Long Quan. The importance of biogas recovery during highconcentration organic wastewater treatment[J]. China Biogas , 2006 , 25 ( 2 ) : 43-45. ( in Chinese )
- [29] Yan Li. Analyzing the feasibility of industrializing methane electricity generation[J]. Solar Energy , 2004 , ( 5 ) : 12-15. ( in Chinese )
- [30] Jian Qi-fei. The methane fuel cell and its application foreground in China[J]. China Biogas , 2003 , 21 ( 3 ) : 32-34. ( in Chinese )
- [31] Li Wei , Yang Xiang-ping , Li Jian-jun , et al. Power and heat generation by methane in Gaobeidian Wastewater Treatment Plant[J]. Water&Wastewater Engineering , 2003 , 29 ( 12 ) : 17-20. ( in Chinese )
- [32] Meng Qing -jie , Sha Li , Zeng Zhi -ying. The production and comprehensive utilization of sludge and biogas in Chinese municipal wastewater treatment plant[J]. China Municipal Engineering , 1996 , ( 4 ) : 53-55. ( in Chinese )
- [33] Ding Weijun, Du Yuji, Ding Jianghua, Yao Yushan. Advances in Urban Wastewater Energyization and Resource Treatment Technology[J]. China Resources Comprehensive Utilization, 2018, 36(08): 94-98+105.
- [34] Lin Qiao, Wang Li, Zhang Jie, Wang Jie, Zhou Wei, Hu Ning. Research Progress of Microbial Fuel Cells[J].Hubei Agricultural Sciences,2014,53(18):4257-4263.
- [35] Zhong Wei. Research progress of microbial fuel cells for wastewater treatment and production capacity [A]. Proceedings of the Annual Meeting of the Chinese Society of

Environmental Sciences, Sichuan University, 2014 Chinese Society of Environmental Sciences (Chapter 5) [C]. China Environmental Science Society, Sichuan University: China Environmental Science Society, 2014: 3.

[36] LIU Yang, YANG Ping. Recovering Biogas Energy and Hydrogen Energy and Electric Energy from Wastewater[J]. Environmental Science and Technology, 2010, 33(10): 133-139.

[37] Wang Ping, Xu Zhibing, et al. Research on Microbial Fuel Cell (MFC) Technology and Its Development Prospects[J]. Energy Conservation Technology, 2008, 26(06): 534-538.

[38] Yang Bing, Gao Haijun, Zhang Ziqiang. Research progress of microbial fuel cells[J]. Life Science Instruments, 2007(01): 3-12.

[39] Zhong Haitao, Wu Qitang. Recovering Energy from Wastewater——Microbial Fuel Cell and Fermentation Biohydrogen Production Technology[J]. Renewable Energy, 2006(03): 46-50.

[40] Kouroussis D, Karimi S. Alternative fuels in Transportation[J]. Bull. Sci. Technol. Soc, 2006, 26(4): 346-355.

[41] You S, Zhao Q, et al. A Microbial Fuel Cell Using Permanganate as the Electron Acceptor[J]. J. Power Sources, 2006, 40(17): 1406-1415.

[42] Logan Bruce E, Regan John M. Electricity-producing bacterial communities in microbial fuel cell[J]. Current Opinion in Biotechnology. 2006, 17(3): 327-321.

[43] Kim H J, Park H S, Hyun M S, et al. A mediator-less microbial fuel cell using a meral reducing bacterium, *Shewanella putrefaciens*[J]. Enzyme Microbiol. Technol, 2002, 30(2): 145-152.

[44] G M Walker, L R. Biological activated carbon treatment of industrial wastewater in stirred tanreactors[J]. Chemical Engineering Journal, 1999, 75(3): 201-206.

[45] LARROSA -GUERRERO A, SCOTT K, HEAD I M, et al. Effect of temperature on the performance of microbial fuel cells [J]. Fuel, 2010, 89 (12): 3985-3994.

[46] WEN Q, WU Y, ZHAO L, et al. Production of electricity from the treatment of continuous brewery wastewater using a microbial fuel cell [J]. Fuel, 2010, 89 (2): 1381-1385.

- [47] WEN Q, WU Y, CAO D, et al. Electricity generation and modeling of microbial fuel cell from continuous beer brewery wastewater [J]. *Bioresource Technology*, 2009,100 (18): 4171-4175.
- [48] CUSICK D R, KIELY D P, LOGAN E B. A monetary comparison of energy recovered from microbial fuel cells and microbial electrolysis cells fed winery or domestic wastewaters[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2010.35 (17): 8855-8861.
- [49] CHAE J K, CHOI J M, KIM AND K, et al. Methanogenesis control by employing various environmental stress conditions in two -chambered microbial fuel cells [J]. *Bioresource Technology*, 2010,101 (14): 5350-5357.
- [50] GREENMANA J, GALVEZB A, GIUSTI L, et al. Electricity from landfill leachate using microbial fuel cells: Comparison with a biological aerated filter [J]. *Enzyme and Microbial Technology*, 2009.44 (2): 112-119.
- [51] GALVEZ A, GREENMAN J, IEROPOULOS I. Landfill leachate treatment with microbial fuel cells; scale-up through plurality [J]. *Bioresource Technology*, 2009,100 (21): 5085-5091.
- [52] MARTINS G, PEIXOTO L, RIBEIRO C D, et al. Towards implementation of a benthic microbial fuel cell in lake Furnas (Azores): Phylogenetic affiliation and electrochemical activity of sediment bacteria [J]. *Bioelectrochemistry*, 2010,78 (1): 67-71.
- [53] BAKHSHIAN S, KARIMINIA H, ROSHANDEL R. Bioelectricity generation enhancement in a dual chamber microbial fuel cell under cathodic enzyme catalyzed dye decolorization [J]. *Bioresource Technology*, 2011,102 (2): 6761-6765
- [54] Wu Zulin, Liu Jing. Research progress in biomass fuel cells. *Power Technology*, 2005, 29(5): 333-340
- [55] Feng Yali, Lian Jing, Du Zhuyu et al. Research progress of non-media microbial fuel cells. *Nonferrous Metals*, 2005, 57(2): 57-59.
- [56] Wang Wei, Wu Yijun, Guo Shaopeng. New fuel cell developed by biotechnology - biofuel cell.
- [57] Bao Wei, Wu Xiaqin. Research progress in biofuel cells. *Electrochemistry*, 2004, 10(1): 1 -9

[58] Lian Jing, Zhu Xueyuan, Li Haoran et al. Research status and application prospects of direct microbial fuel cells. Science and Technology and Engineering, 2005, 5(22): 17-19.